

С.А.Ермаков*, И.А.Сергиевская*, И.А.Капустин*,
Е.В.Макаров*, В.В.Малиновский**, А.Е.Кориненко**

**Институт прикладной физики РАН, г.Нижний Новгород,*

***Морской гидрофизический институт НАН Украины, г.Севастополь*

РАСТЕКАНИЕ И ДРЕЙФ ПЛЕНОК В ПОЛЕ ВЕТРА И ТЕЧЕНИЙ. НАТУРНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ С ОКЕАНОГРАФИЧЕСКОЙ ПЛАТФОРМЫ МГИ НАНУ

Данная работа посвящена исследованию закономерностей растекания пленок поверхностно-активных органических веществ с низкой поверхностной концентрацией вещества в режиме поверхностного натяжения. Исследован эффект деформации слика в поле ветра (вытягивание сликового пятна по направлению ветра). Для объяснения эффекта деформации слика предложен механизм воздействия ветра на слик через поверхностное ветровое волнение. Показано, что при определенных условиях аксиально симметричный слик деформируется и принимает форму, параметры которой определяются скоростью ветра.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *поверхностная пленка, коэффициент поверхностного натяжения, ветровой дрейф.*

Важным аспектом проблемы исследования сликов на морской поверхности является изучение их временной динамики. Большой интерес в данном вопросе обусловлен задачами обнаружения нефтяных разливов и прогноза вероятных сценариев дальнейшего развития ситуации.

Естественно, что в случае разлива нефти, мазута, или других экологически вредных веществ, раннее обнаружение разлива и знание возможных сценариев развития ситуации представляет собой особый интерес.

Одним из важных параметров нефтяных (или другого происхождения) пятен – сликов является их характерный размер. Общепринятые теоретические модели разделяют процесс расплывания пятен на характерные временные стадии растекания. В каждой стадии растекания преобладает тот или иной физический механизм.

Так, согласно классической работе Фэя [1], выделяют три режима: инерционный, гравитационно-вязкий и режим поверхностного натяжения. Однако, позднее было показано, что модель Фэя является приближенной и не описывает все режимы растекания. В основном уточнения касаются переходных режимов растекания. Так, например, в [2] установлено, что между гравитационно-инерционным и гравитационно-вязким режимами находится переходный инерционно-вязкий режим. В [3], где рассматриваются процессы растекания вещества в одномерном приближении в рамках уравнений мелкой воды, показано, что режимы в классификации Фэя являются асимптотиками более сложных решений.

Теоретические модели растекания пленок, а также результаты экспериментов можно также найти, например, в [4 – 6] и цитированной там литературе.

Отметим, что в приведенных выше работах не рассматривается большое количество факторов и процессов, влияющих на динамику нефтяных

© С.А.Ермаков, И.А.Сергиевская, И.А.Капустин,
Е.В.Макаров, В.В.Малиновский, А.Е.Кориненко, 2010

разливов. Однако используемые на практике модели учитывают эмпирически ряд факторов, таких как испарение вещества, биodeградацию, перемешивание с водой, влияние льда и т.д. В то же время, ряд гидродинамических процессов (в частности, роль ветра, неоднородности течений, внутренних и поверхностных волн), влияющих на динамику (растекание) нефти, экспериментально исследован пока недостаточно. В настоящее время существуют численные модели влияния циркуляции Лэнгмюра и обрушений ветровых волн на дрейф и растекание нефтяных разливов [7, 8].

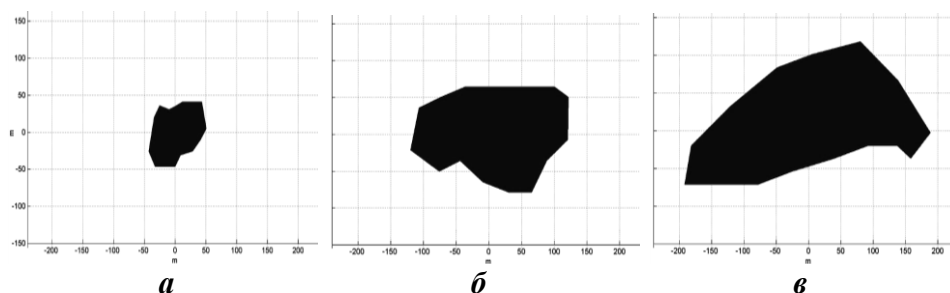
Упомянутые динамические процессы в верхнем слое океана и приповерхностного слоя атмосферы могут влиять на геометрическую структуру нефтяных загрязнений на больших временах. Кроме того, данные факторы играют определяющую роль при формировании биогенных (естественных) slickов.

Отметим довольно малое количество натурных экспериментов в данной области. Типичным примером натурального «эксперимента» является изучение динамики нефтяного пятна после катастрофы танкера [9], где наблюдалось растекание в течение длительного периода времени.

В данной работе, продолжающей цикл исследований механизмов формирования slickов, ведущихся в Институте прикладной физики (ИПФ) РАН [8], представлены результаты натурных экспериментов, выполнявшихся совместно ИПФ и Морского гидрофизического института (МГИ) НАНУ в прибрежной зоне Черного моря. Рассмотрены результаты экспериментов по изучению растекания тонких пленок, в том числе, с учетом влияния ветра.

Описание эксперимента с использованием фотосъемки. Эксперименты по исследованию растекания пленок на морской поверхности проводились в 2004 – 2008 гг. сотрудниками МГИ и ИПФ в прибрежной зоне Черного моря в районе океанографической платформы ЭО МГИ и в районе Южного отделения Института океанологии РАН. Разлив органического вещества производился со шлюпки на значительном удалении от берега (0,5 – 2 км), глубина моря составляла около 30 – 60 м. С берега высотой около 60 – 100 м производилась фотосъемка слика на морской поверхности. Координаты разлива и места установки фотоаппарата фиксировались с помощью навигаторов *GPS*. Фотографирование местности производилось через каждые 4 – 5 мин в течение всего эксперимента. Из полученных изображений с использованием данных *GPS* навигаторов, расположенных на шлюпке и в точке фотосъемки, восстанавливался контур слика на поверхности моря и рассчитывались размеры слика. В качестве поверхностно-активного вещества использовалось растительное масло. В ходе эксперимента сотрудниками МГИ было выполнено 16 серий измерений при скоростях ветра от 1,6 до 11,7 м/с, количество разливаемого масла составляло 170 или 340 мл. Более подробно методика проведения эксперимента и определения размеров пленки представлена в [11]. Сотрудниками ИПФ было проведено 4 серии экспериментов (в том числе один подспутниковый) при небольших скоростях ветра, в каждом эксперименте разливалось около 2 – 3 л растительного масла.

Полученные результаты. *Изменение размеров пленочного слика.* На рис.1 приведен пример восстановленного контура слика в разное время после разлива (эксперимент 2004 г.). За время эксперимента слик в результате дрейфа преодолел расстояние порядка 2500 м. Средняя скорость движения слика составила около 20 см/с.



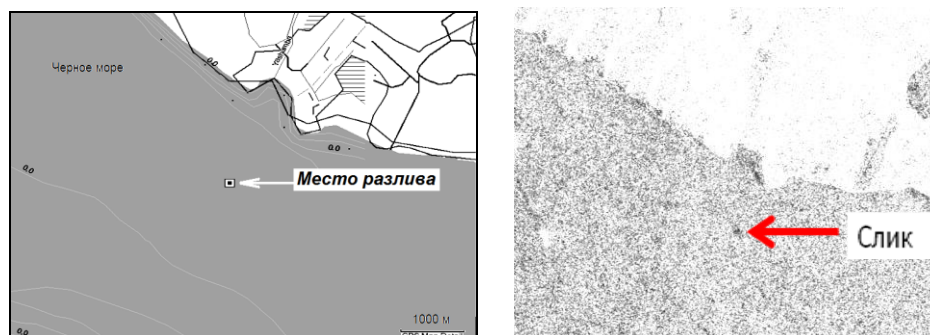
Р и с . 1 .Форма слика на последовательных стадиях растекания: начало растекания ($t = 0$) (а); $t = 45$ мин (б); $t = 120$ мин (в).

Во время подспутникового эксперимента разлив вещества проводился за 40 мин до пролета спутника *ENVISAT* в данном регионе. На рис.2 приведена карта местности с указанной точкой разлива и радиолокационное изображение слика.

На рис.3 представлена измеренная группой ИПФ зависимость эффективного диаметра пятна $L_e = 2\sqrt{(\int dx dy)/\pi}$ как функции времени. Как видно из рис.3 характерный размер пятна увеличивался от 70 – 90 м (в начале эксперимента) до 250 – 300 м. Начиная с некоторого времени после разлива размер слика практически не меняется.

Сопоставим характер полученной зависимости размера слика от времени с теоретическими моделями. В модели [1] в инерционном режиме в модели приближенно осесимметричного пятна зависимость изменения его радиуса $r(t)$ от времени имеет вид $r(t) \sim t^{1/2}$. Этот режим реализуется на начальной стадии растекания пятна, при объемах вылитого вещества свыше 10 м^3 и продолжается от нескольких минут до нескольких часов. Следующая стадия – гравитационный режим растекания. Закон растекания здесь имеет вид $r(t) \sim t^{1/4}$, и может продолжаться от единиц до нескольких десятков часов, в зависимости от объема разлитого вещества.

Конечная стадия растекания пятна проходит в режиме поверхностного натяжения. Длительность этой стадии также существенно зависит от объема вещества, при этом, если объем вылитого вещества не превышает 1 м^3 , полагают, что фактически с самого начала растекания пятна реализуется режим поверхностного натяжения. Следует ожидать, что именно данный режим и реализовался в описываемом эксперименте.



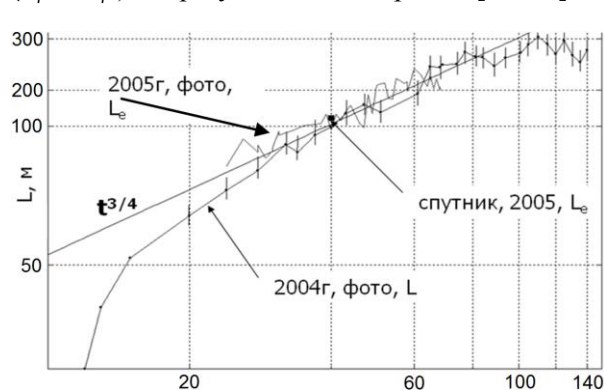
Р и с . 2 . Карта района экспериментов и его радиолокационное изображение.

Из баланса сил вязкости и поверхностного натяжения следует зависимость радиуса пятна от времени вида

$$r(t) = C \left(\frac{T}{\rho \sqrt{\nu}} \right)^{1/2} t^{3/4}. \quad (1)$$

Здесь ρ – плотность воды, ν – коэффициент кинематической вязкости воды; $T = \sigma_{wa} - (\sigma_{fa} + \sigma_{fw})$ – коэффициент растекания, определяемый коэффициентами межфазного натяжения вода – воздух σ_{wa} , вода – пленка σ_{fw} , пленка – воздух σ_{fa} ; для растекания необходимо выполнение условия $T > 0$; C – числовой коэффициент, величина которого по данным экспериментов для нефтяных пленок составляет 2,3 [5]. Следует отметить, что указанная формула получена в предположении, что толщина пленки меньше, чем толщина вязкого пограничного слоя.

Величина коэффициента поверхностного натяжения воды с пленкой ($\sigma_{fa} + \sigma_{fw}$), по результатам измерений [10, 11] для насыщенного моно слоя растительного масла составля-



Р и с . 3 . Зависимость размера сликов от времени.

ет величину 40 мН/м, так что значение $T = 30$ мН/м, т.е. $T > 0$. Как видно из графика (рис.3), растекание слика действительно подчиняется закону $r(t) \sim t^{3/4}$ на значительном временном интервале. Существенное отличие модели и данных эксперимента наблюдается на ранней стадии – в процессе разлива, а также на

достаточно больших временах, когда масштаб слика перестает расти.

Изменение формы слика под действием ветра. Вопрос о влиянии волн и ветра на растекание поверхностных пленок к настоящему времени изучен недостаточно. Как правило, в экспериментах наблюдается вытягивание области, покрытой пленкой, в направлении ветра.

На рис.4 представлено изображение слика растительного масла в районе океанографической платформы МГИ через 50 мин после разлива вещества.

Сопоставление направления большей оси области, покрытой пленкой, с направлением ветра демонстрируется на рис.5. Как следует из рисунка, слики вытягиваются вдоль направления ветра. Полученные данные качественно согласуются с результатами ранних натурных исследований [14, 15].

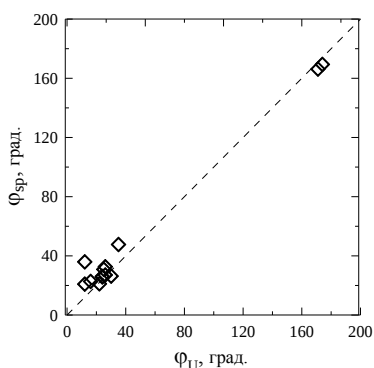
На рис.6 представлена зависимость отношения осей сликов (вдоль $l_{\parallel}$ и поперек $l_{\perp}$ ветра), наблюдаемых группой ИПФ при скоростях ветра около 2 м/с, от времени после разлива. Отметим, что одна из точек была получена по данным спутникового радиолокационного изображения. Из рис.6 видно, что сразу после разлива слик начинает вытягиваться по ветру, а через некоторое время, когда соотношение осей становится равным приблизительно 2, его форма перестает меняться.

Измененные группой МГИ зависимости отношения $l_{\parallel}/l_{\perp}$ от времени в диапазоне скоростей ветра от 9 до 11,6 м/с и 6 до 9 м/с представлены на рис.7,

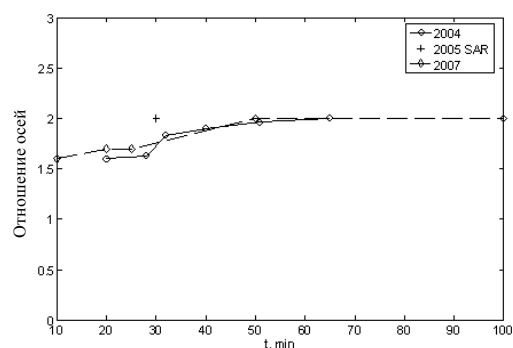


Р и с . 4. Изображение слика растительного масла в районе океанографической платформы МГИ через 50 мин после разлива вещества. Скорость ветра 2 м/с.

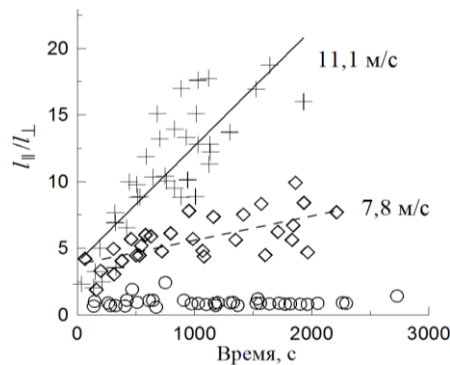
символами «+», «◇» соответственно. Сплошной и штриховой линиями показаны аппроксимирующие прямые для указанных групп точек, рассчитанные методом минимального квадрата ошибок. Значение отношения осей при скоростях ветра меньших 3,3 м/с обозначены символами (○). Как видно из рис.7, при малых скоростях ветра отношение осей лежит в пределах от 0,9 до 1,1. Таким образом, в штилевых ветровых условиях поверхностные пленки имели практически форму круга, что характерно для растекания пленки только за счет сил поверхностного натяжения. С усилением скорости ветра искусственный слик становится более вытянутым и при $U = 11$ м/с значения $l_{\parallel}/l_{\perp}$ в конце наблюдений достигают ~ 18 . Такое поведение отношения осей слика согласуется с результатами экспериментов [16], где было показано, что как скорости растекания пленки, так и отношение $l_{\parallel}/l_{\perp}$ увеличиваются с ростом скорости ветра. В то же время, как показано в [16], форма слика практически не зависит от высоты длинных волн.



Р и с . 5. Сопоставление направления большей оси слика с направлением скорости ветра.



Р и с . 6. Отношение осей слика в зависимости от времени.



Р и с . 7. Временная зависимость отношения осей слик при различных скоростях ветра.

Для объяснения вытягивания пленки на морской поверхности в направлении ветра учтем влияние поверхностных волн. На границе слик затухающие поверхностные волны создают дополнительное давление на слик за счет индуцированного ими течения, направленного внутрь слика. Механизм давления на пленку со стороны затухающих поверхностных волн исследовался, например, в [8]. Для рассмотрения задачи об изменении формы слика обратимся к теории Фэя, добавив силу F_i , описывающую влияние индуцированного течения. Мож-

но показать, что выражение для отношения осей (в направлении ветра $l_{||}$ и перпендикулярно ветру $l_{\perp}$) пленочного пятна будет иметь вид

$$\frac{l_{||}}{l_{\perp}} = \left(\frac{S}{S - I} \right)^{1/2}, \quad (3)$$

где S – разность коэффициентов поверхностного натяжения, l – размер слика, I описывает влияние индуцированного течения, определяемое коротковолновой частью спектра волнения и масштабами затухания волн, $F_i = I \cdot l$. Из (3) следует, что слик имеет форму, вытянутую по ветру, форма слика не зависит от времени, а определяется только коротковолновой частью спектра и характеристиками пленки. Это объясняет независимость формы слика от высоты длинных волн.

Наиболее просто оценить соотношение осей слика для малой скорости ветра, когда возбуждение волн происходит в режиме слабой надкритичности. В этом случае область затухания возбуждаемых волн для волнового числа порядка 1 рад/см составляет ~ 2 мв [10], и отношение осей равно приблизительно 2, что, как видно из рис.6, хорошо согласуется с результатами экспериментов.

Выводы. Данные натурных экспериментов подтверждают теоретические оценки законов растекания тонких пленок поверхностно-активных веществ при малых скоростях ветра. В проведенных экспериментах был зарегистрирован закон $L \sim t^{3/4}$, что согласно классификации [1] соответствует режиму растекания с преобладающей ролью сил поверхностного натяжения.

Было отмечено вытягивание пленочных пятен вдоль направления ветра в форме эллипса. Обнаружено, что отношение осей эллипса увеличивается с увеличением времени после разлива и с увеличением скорости ветра от ~ 2 для слабо надкритичного режима возбуждения ветрового волнения (малые скорости ветра) до ~ 18 при скоростях ветра 11 м/с. Величина отношения осей не зависит от высоты длинных волн.

Предложена модель воздействия волн на пленку и показано, что форма слика остается неизменной во времени и зависит только от коротковолновой части спектра волнения и характеристик пленок. Оценки, сделанные в рамках слабо надкритичного режима возбуждения поверхностного ветрового волнения (слабый ветер), демонстрируют хорошее согласие с экспериментом.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты 08-05-00634, 10-05-00101, 08-05-97011, 09-05-97019), Государственного фонда фундаментальных исследований Украины (договор № Ф28/435-2009) и проекта НИР по гранту НАН Украины (договор № 11/10 от 10.06.2010).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fay J.A. The spread of oil slicks on a calm sea / Oil on the Sea/ Ed. by Hoult D.P.– Plenum New York, 1969.– P.53-63.
2. Unno H., Inoue I. Initial behavior of oil slick // J. Chem. Eng. Jap.– 1978.– v.11, № 1.– P.13-18.
3. Кортаев Г.К., Кровотынцев В.А. Интегральная модель динамики нефтяного разлива // Дистанционное зондирование океана.– Севастополь: МГИ АН УССР, 1982.– С.108-115.
4. Монин А.С., Красицкий В.П. Явления на поверхности океана.– Л.: Гидрометеопиздат, 1985.– 376 с.
5. Журбас В.М. Основные особенности распространения нефти в море / Итоги науки и техники. Механика жидкости и газа.– М.: ВИНТИ, 1978.– т.12.– С.144-159.
6. Phillips W.R.C. On the spreading radius of surface tension driven oil on deep water // Appl. Scient. Res.– 1997.– 57.– P.67-80.
7. Мадерич В.С., Бровченко И.А. Влияние обрушения ветровых волн на структуру приповерхностного турбулентного слоя // Прикладная гидромеханика.– 2003.– 5(77), № 3.– С.65-71.
8. Бровченко И.А., Мадерич В.С. Численный лагранжевый метод моделирования распространения поверхностных пятен нефти // Прикладная гидромеханика.– 2002.– 4(76), № 4.– С.23-31.
9. Murray S.P. Turbulent diffusion of oil in the ocean // Limnology and oceanography.– 1972.– v.XVII, № 5.– P.651-660.
10. Гуцин Л.А., Ермаков С.А. Лабораторное исследование перераспределения поверхностно-активных веществ в поле течений, индуцированных поверхностной волной // Изв. РАН. ФАО.– 2004.– т.40, № 2.– С.277-282.
11. Малиновский В.В., Дулов В.А., Кориненко А.Е., Большаков А.Н., Смолов В.Е. Натурные исследования дрейфа тонких искусственных пленок на морской поверхности // Изв. РАН. ФАО.– 2007.– т.47, № 1.– С.117-127.
12. Ермаков С.А., Кияшко С.В., Конов И.Р. О возможности определения параметра упругости поверхностно-активных пленок по измерению затухания стоячих капиллярно-гравитационных волн // Изв. РАН. ФАО.– 1996.– т.32, № 4.– С.544-547.
13. Ермаков С.А., Сергеевская И.А., Зуйкова Э.М., Кияшко С.В., Щегольков Ю.Б. Об эффекте изменения доплеровских сдвигов частоты радиолокационных сигналов в присутствии органических пленок на морской поверхности // Докл. РАН.– 2003.– т.388, № 1.– С.109-112.
14. Elliott A.J. Shear diffusion and the spread of oil in the surface layers of the North Sea // Ocean Dynamics.– 1986.– v.39, № 3.– P.113-137.
15. Lehr W.J., Cekirge H.M., Fraga R.J., Belen M.S. Empirical studies of the spreading of oil spills // Oil and Petrochemical Pollution.– 1984.– № 2.– P.7-12.
16. Иванов В.А., Малиновский В.В., Кориненко А.Е. Натурные исследования растекания тонкой искусственной пленки на морской поверхности // Доп. НАН України.– 2010.– № 3.– С.125-130.

Материал поступил в редакцию 1.10.2010 г.